

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.067



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



不同热处理工艺下大直径 NiTi-SMA 棒材 的超弹性试验研究

田鹏刚^{1,2}, 温景北³, 杨汶杰^{1,2}, 刘康宁^{1,2}, 王佳佳^{1,2}, 熊二刚³

(1. 陕西建工控股集团未来城市创新科技有限公司, 西安 712000; 2. 未来城市建设与管理创新
联合研究中心, 西安 712000; 3. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061)

摘要:在阻尼元件中添加大直径超弹性 NiTi 形状记忆合金(NiTi-SMA)棒能使其获得良好的自复位能力,但 SMA 材料对温度具有较高敏感性,不同的热处理工艺对 NiTi-SMA 棒的力学性能影响较大,导致含 NiTi-SMA 棒材阻尼器或支撑的耗能能力及自复位能力受到不同程度的影响,故有必要探究不同热处理工艺对大直径 NiTi-SMA 棒材力学性能的影响。首先对 7 根工作段直径均为 9 mm 的 NiTi 形状记忆合金棒(镍含量为 59.9%)进行不同工艺热处理,然后进行增幅循环拉伸试验,研究不同热处理工艺和增幅循环拉伸对试件的应力-应变关系、残余应变、耗能能力等性能的影响。结果表明:适当热处理能显著提高 NiTi-SMA 棒材的超弹性,其应力-应变曲线呈典型的旗帜形,工作直径为 9 mm 的 NiTi-SMA 棒材的最佳热处理温度和时长分别为 400 °C 和 30 min,且越接近该热处理工艺,试件的耗能能力、割线刚度及等效阻尼比越稳定。

关键词:形状记忆合金;增幅循环拉伸试验;热处理;超弹性;自复位

中图分类号: TU391; TU352.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)05-0052-08

Experimental analysis on superelasticity of large-diameter NiTi-SMA bars under different heat treatment processes

TIAN Penggang^{1,2}, WEN Jingbei³, YANG Wenjie^{1,2}, LIU Kangning^{1,2},
WANG Jiajia^{1,2}, XIONG Ergang³

(1. Shaanxi Construction Engineering Holding Group Science and Technology Innovation of Future City Co., Ltd., Xi'an 712000, P. R. China; 2. SCEGC-XITU Joint Research Center for Future City Construction and Management Innovation, Xi'an 712000, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, P. R. China)

Abstract: The addition of large-diameter hyperelastic NiTi shape memory alloy (NiTi-SMA) bars to damping elements has been demonstrated to achieve effective self-centring capability. However, given the high sensitivity

收稿日期: 2025-03-05

基金项目: 未来城市建设与管理创新联合研究中心揭榜挂帅基金(2024WHZ0225); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2025JC-YBMS-390)

作者简介: 田鹏刚(1978-), 男, 教授级高工, 主要从事工程结构抗震研究, E-mail: tpg97537@163.com。

熊二刚(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: x-e-g@163.com。

Received: 2025-03-05

Foundation items: Project Funded by the Joint Research Center for Future Urban Construction and Management Innovation (No. 2024WHZ0225); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (No. 2025JC-YBMS-390)

Author brief: TIAN Penggang (1978-), professor-level senior engineer, main research interest: seismic resistance of engineering structures, E-mail: tpg97537@163.com.

XIONG Ergang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: x-e-g@163.com.

of SMA materials to temperature, it is important to note that different heat treatment processes can have a certain impact on the mechanical properties of NiTi-SMA bars. This, in turn, can result in varying degrees of influence on the energy dissipation and self-centering ability of dampers or supports containing NiTi-SMA bars. It is therefore essential to conduct a thorough investigation into the impact of diverse heat treatment processes on the mechanical properties of large-diameter NiTi-SMA bars. This article first conducted different heat treatment processes on seven Ni-59.9% at Ti bars with a working section diameter of nine mm, followed by amplified cyclic tensile tests to investigate the effects of different heat treatment processes on the stress-strain relationship, residual strain, energy dissipation capacity, and other properties of the specimens. The research results indicate that appropriate heat treatment can significantly improve the superelasticity of NiTi-SMA bars, with typical flag-shaped stress-strain curves. The present study investigates the effects of heat treatment temperature and duration on the properties of NiTi-SMA bars with a working diameter of nine mm. The results demonstrate that the optimal heat treatment process for these bars is 400 °C for 30 minutes. It is observed that as the heat treatment process approaches the optimal value, the energy dissipation capacity, secant stiffness, and equivalent damping ratio of the specimens exhibit increased stability.

Keywords: shape memory alloy; amplified cyclic tensile test; heat treatment; hyperelasticity; self-centering

智能材料是一类能够自我感应并适应光、热、电等外界刺激的新兴材料^[1]。形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)作为一种典型的智能材料,因具有独特的形状记忆效应、超弹性效应、良好的力学性能、耐疲劳、耐腐蚀等特点,在机械电子、航空航天以及土木工程领域得到了广泛的研究和应用^[2-4]。

SMA一般具有两种金相:高温稳定的奥氏体相和低温稳定的马氏体相,其中奥氏体相又被称为母相。奥氏体与马氏体之间的可逆相变是SMA最基本的特征,该相变伴随着晶体无扩散切变过程,与传统的金属扩散存在本质差异^[5]。在一定的恒温范围内,由外荷载产生的应力可诱发SMA材料中奥氏体相转变为马氏体相,当外荷载消失时,会自发地进行逆相变,回到原来的母相状态,此种行为称为SMA的超弹性。SMA的形状记忆效应是指经过一定热循环后变形后的SMA能够恢复到初始形状的能力。目前,基于这两种特性的SMA达几十种,而NiTi-SMA因具有稳定的性能、适宜的工作温度、成熟的生产工艺等特点,在土木工程中应用十分广泛^[6-7]。

Liu等^[8]对NiTi-SMA棒进行了单调加载和循环加载试验,并从微观角度对其拉压非对称现象进行分析。李灿军等^[9]对不同工作段直径的NiTi-SMA棒材进行了循环拉伸试验,结果表明,随着加载幅值的增加,NiTi-SMA棒的耗能能力显著提高,棒材尺寸对其力学性能无明显影响。王伟等^[10-11]对NiTi-SMA棒进行了一系列循环拉伸试验,研究了热处理工艺、尺寸效应及预应变对SMA棒材滞回行为的影响。Xu等^[12]采用工作段直径为14 mm的

NiTi-SMA棒进行试验研究,获得了其合适的加工工艺。俞昊然等^[13]针对经过不同热处理工艺处理的4根NiTi-SMA棒材开展了常幅循环拉伸试验,探讨循环次数及热处理工艺对SMA棒材滞回性能的作用规律,并基于试验数据对棒材力学性能的退化特性进行了深入分析。康莉萍等^[14]对4种不同直径的SMA棒材进行拉伸试验,分析了热处理制度、加载-卸载循环次数及应变幅值对其超弹性性能的影响,为SMA棒材力学性能的工程应用提供了有益参考。然而,现有研究多聚焦于单一或有限热处理参数的对比,缺乏对热处理制度系统性设计与多组参数组合影响规律的深入探讨,试验方案在覆盖范围及工程适用性方面尚显不足。

近年来,众多学者利用NiTi-SMA棒材高阻尼及超弹性的特性,将其应用于各式各样的阻尼器和支撑中,既有利于增加阻尼元件的能量耗散,又能达到自复位的效果。常召群等^[15]基于大直径Ni-Ti-SMA棒的超弹性性能设计了一种新型自复位摩擦阻尼器,数值模拟分析表明,该新型阻尼器具有稳定、饱满的滞回曲线且残余变形可控。Chen等^[16]利用大直径NiTi-SMA棒与楔形面的摩擦,提出一种自复位可变摩擦阻尼器,推导了阻尼器的恢复力模型,并对其滞回行为进行了预测。邱灿星等^[17-20]提出了一种与Chen等^[16]类似的具有可变摩擦功能的新型自复位阻尼器,通过试验、理论分析及模拟验证了该阻尼器具有优越的自复位及耗能能力。综上所述,采用NiTi-SMA棒材不仅能提升阻尼器在滞回循环中的耗能能力,还能使其获得自复位能力。然而,SMA材料对温度具有较高敏感性,大直径NiTi-SMA棒材在使用前需进行热处理,若热处

理工艺不佳会导致其产生较大残余变形,进而对 NiTi-SMA 阻尼器的自复位效果产生不利影响。因此,对大直径 NiTi-SMA 棒材采用不同热处理工艺并研究其在循环拉伸荷载下的滞回行为具有重要意义。

笔者采用 7 根工作段直径均为 9 mm 的 NiTi-SMA 棒材,经过不同热处理工艺后对其进行增幅循环拉伸试验,研究热处理工艺及应变幅值对大直径 NiTi-SMA 棒材的应力-应变关系、残余应变及耗能能力等性能的影响。

1 试验

1.1 试件设计与制备

采用 Ni 原子含量为 59.9% 的 NiTi 合金棒材,其奥氏体临界相变温度 A_f 为 5°C ,常温下处于奥氏体形态,具体成分如表 1 所示。试件根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[21] 的规定设计加工为狗骨形(工作段直径为 9 mm),以确保拉伸试验的规范性和可比性,具体尺寸如图 1 所示。Ni-Ti-SMA 棒材的热处理最佳温度范围和持续时间分别为 $350\sim 450^{\circ}\text{C}$ 和 $15\sim 45\text{ min}$ ^[22]。为进一步比较不同热处理工艺对工作段直径为 9 mm 的 NiTi-SMA 棒材力学性能的影响,对加工完成的 7 根试件设置不同的热处理温度及时长(如 T350/15 表示 350°C 保温 15 min)。热处理过程采用箱式电阻炉,具体流程为:预先将炉内升温至设定温度并维持 30 min 以稳定热场,随后将试样置入炉膛进行保温处理,待保温结束后取出试件并迅速放入水中淬火冷却。热处理装置如图 2 所示。

表 1 SMA 棒的化学组成

Table 1 Chemical constituents of SMA bars

单位: %

Ni	Co	Cu	Cr	Fe	Nb	C	H	O	Ti
59.90	0.005	0.005	0.005	0.012	0.005	0.048	0.001	0.039	余量

注:表中各元素含量为原子含量。

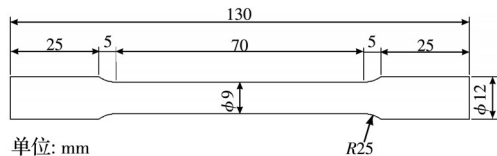


图 1 NiTi-SMA 棒材试件的几何尺寸

Fig. 1 Geometric dimensions of NiTi-SMA bar specimens

需要指出的是,选用直径为 9 mm 的 NiTi-SMA 棒材作为试验对象主要基于以下考虑:该规格为目前 SMA 材料在工程应用中常用的商业尺寸,尤其在结构减振、振动控制等领域广泛使用,具有较强



图 2 热处理装置

Fig. 2 Heat treatment apparatus

的工程代表性和现实意义。此外,为确保热处理的均匀性及试验可重复性,选择中等直径规格有助于在控制成本的同时获得稳定的材料性能数据。尽管 SMA 棒材的直径变化可能对具体的应力-应变响应产生影响,但在相同合金成分及热处理工艺条件下,其超弹性行为的基本变化趋势具有一致性。因此,热处理对 SMA 力学性能的影响规律具有一定普适性,对其他规格的 SMA 棒材亦有参考价值。

1.2 试验装置及加载制度

基于电子万能试验机平台,所有试验均在室温环境下进行并采用增幅循环拉伸,应变幅值逐级递增($1\%\sim 6\%$),每级循环 2 次。试验机能提供的最大力为 100 kN。试件的应力数据通过试验机内置传感器进行测量,并由计算机系统自动记录;应变数据则通过标距为 50 mm 的引伸计实时采集。试验装置的布置如图 3 所示,加载制度的具体设置如图 4 所示。对试件进行应变幅值为 $1\%\sim 6\%$ 的逐级递增加载卸载循环拉伸试验,每级加载循环 2 圈。试验加载阶段为位移控制(速率 $0.0005/\text{s}$),卸载阶段转为应力控制(速率 10 MPa/s)。通过对比滞回曲线形态及关键参数(如 σ_{Ms} 、 σ_{Af} 、 ϵ_{res}),量化热处理工艺的影响。

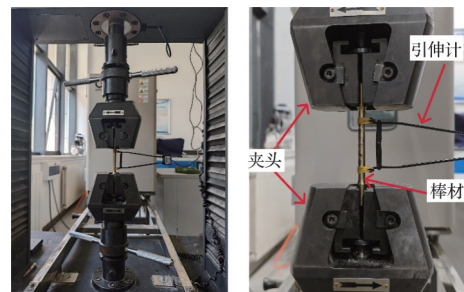


图 3 试验装置

Fig. 3 Experimental apparatus

2 材料性能参数定义

NiTi 形状记忆合金棒材在单次拉伸-卸载循环中的力学响应特性如图 5 所示。其中, σ_{Ms} 和 σ_{Mf} 分别为马氏体相变开始应力和结束应力, σ_{As} 和 σ_{Af} 分别为

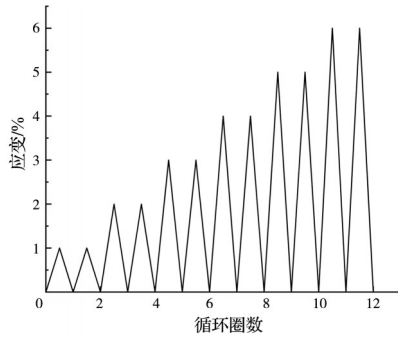


图4 加载制度

Fig. 4 Loading system

奥氏体相变开始应力和终止临界应力。值得注意的是, σ_u 作为材料循环加载过程中的峰值抗拉强度, 与 ε_{res} (单次循环后不可恢复的塑性变形量) 共同构成评价材料超弹性的核心参数。NiTi-SMA 棒耗能力通过加卸载循环过程中的能量耗散值 W_D (即图5中应力-应变曲线所包围的面积) 和等效阻尼比 ξ 等参数来反映。采用割线刚度 K 反映 NiTi-SMA 棒材在循环拉伸过程中的刚度退化。

$$K = \frac{F_u}{\delta_u} \quad (1)$$

式中: F_u 和 δ_u 分别为 NiTi-SMA 棒材处于极限拉应力下所对应的最大荷载及位移。

等效阻尼比采用式(2)计算。

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_E} = \frac{W_D}{2\pi K \delta_u^2} \quad (2)$$

式中: W_E 为最大荷载与位移对应的线弹性体系在单个加卸载循环过程中产生的总应变能密度。

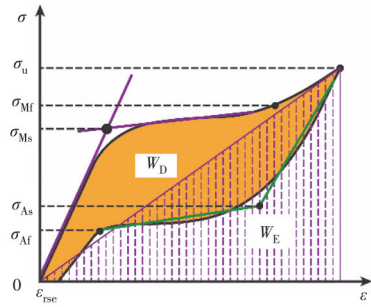


图5 NiTi-SMA 应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship of NiTi-SMA

3 试验结果

3.1 应力-应变曲线分析

为了分析热处理工艺对 NiTi-SMA 棒材力学性能的影响, 将7根 NiTi-SMA 棒材分别在 350、400、450 °C 下加热 15、30、45 min。试件在不同热处理工艺后的循环拉伸应力-应变曲线如图6所示。从图6可以发现, 在热处理条件下, 第1圈的初始屈服应力均高于第2圈, 表明在首次加载过程中材料经历了较大塑性变形, 导致应力增加。由于 SMA 材料的相变特性, 滞回曲线存在明显应力平台。图6(a)为热处理温度和时长分别为 350 °C 和 30 min 时 NiTi-SMA 棒材的滞回曲线, 由图6(a)可知, 加卸载循环后试件的残余变形达 2.8%, 说明不充分的热处理过程使试件产生较低的超弹性。适当增加热处理温度及时长, 试件的应力-应变曲线正、逆相变平台明显, 呈典型的“旗帜形”滞回曲线, 大多数试样在加载初期具有相对稳定的正相变平台, 随着应变幅值的增加, 逆相变平台大幅降低。当热处理温度为

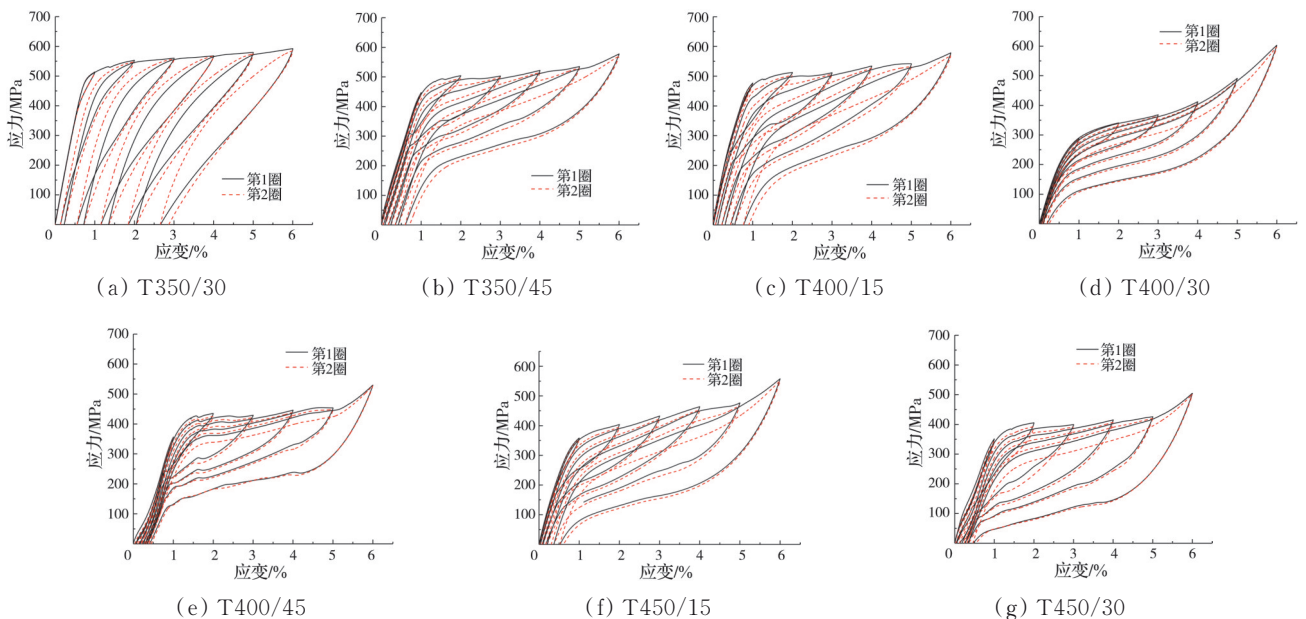


图6 不同热处理工艺下 NiTi-SMA 棒的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of NiTi-SMA bars under different heat treatment processes

400 ℃、保温时长为 30 min 时,试件的残余应变值达到最低水平;同时,当应变幅值不超过 5% 时,试件的残余应变值低至 0.18%,当应变幅值为 6% 时,残余应变增大至 0.25%,且应力-应变曲线表现出明显的马氏体硬化现象。因此,在实际使用时,宜控制该 NiTi-SMA 棒材的最大受拉应变为 5%,以保证阻尼元件具有良好的自复位效果。继续增大热处理温度,试件的正、逆相变平台依旧明显,滞回曲线更加饱满,显示出更好的力学性能,但残余变形随着加载的进行不断累积,试件的超弹性性能逐渐降低。

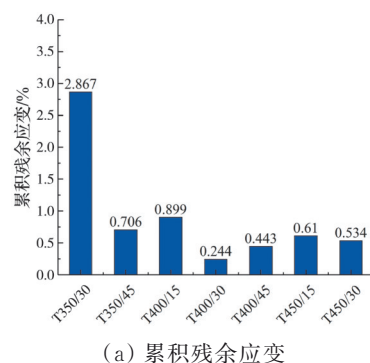
当 NiTi-SMA 棒材循环拉伸时,与第 1 圈滞回曲线相比,第 2 圈虽然应力平台有所降低,但整体趋势保持一致,表明 SMA 材料具有良好的循环稳定性。热处理温度和时间对 SMA 的相变特性有显著影响,适当热处理可以优化材料的相变温度和相变应力,从而提高其力学性能。然而,过高的热处理温度或过长的时间会使材料的相变应力减小,根据文献[23],这可能与材料颗粒尺寸和 Ti_3Ni_4 析出程度有关,因为 Ti_3Ni_4 的析出物形成的内部应力场降低了相变应力。

3.2 残余应变

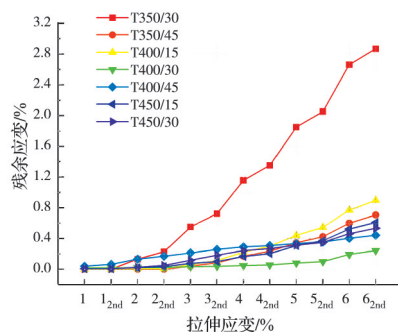
图 7(a)给出了试件经不同热处理工艺后在 6% 应变幅值下产生的累积残余应变。当热处理温度和时间分别为 350 ℃和 30 min 时,试件的累积残余应变最大,其值为 2.9%,不具有超弹性性能。当热处理温度为 400 ℃时,随着保温时长的增加,试件的累积残余应变呈先减小后增大趋势,分别为 0.89%、0.24% 和 0.44%。同时可以发现,试件 T400/30 残余变形最小,结合对应力-应变曲线的分析可知,工作段直径为 9 mm 的 NiTi-SMA 棒材在热处理工艺为 400 ℃、30 min 下表现出最佳的超弹性性能。当热处理温度为 450 ℃时,试件 T450/15、T450/30 的累积残余变形分别为 0.61% 和 0.534%,表明 450 ℃是一个有效的热处理温度,可以适当减少残余变形,但相较 400 ℃、30 min 的热处理工艺有所增长,可能是由于 450 ℃的热处理温度较高, NiTi-SMA 棒材存在轻微过火,致使超弹性特性有所损失。

图 7(b)为不同热处理工艺下试件的残余应变随应变幅值的变化规律。当应变幅值低于 3% 时,试件的残余应变保持在 0.4% 以下;然而,当应变幅值超过 3% 并持续增大时,残余应变呈显著增长趋势。随着循环次数的增加,试件 T350/30 的残余应变增加幅度较为显著,在第 6 次循环时达到最高值。

表明在该热处理条件下, NiTi-SMA 棒材的自恢复能力较差,这主要是热处理时间不足所致。试件 T350/45 的残余应变相对较低,且增长趋势较为平缓,说明 45 min 热处理时间更有利于提高材料的自恢复能力。在 400、450 ℃热处理条件下,残余应变相对较低,且增长趋势较为平稳。表明适当提高热处理温度有助于减少残余应变,提高材料的循环稳定性。整体上,经不同热处理工艺后的 NiTi-SMA 棒第 2 圈拉伸后残余应变表现出不同程度的增加,越接近最佳热处理工艺,试件的循环稳定性越好。其中热处理温度和时间分别为 400 ℃、30 min 时 NiTi-SMA 棒具有最好的循环稳定性和最低的残余应变。



(a) 累积残余应变



(b) 每循环一圈后的残余应变

图 7 不同热处理工艺下 NiTi-SMA 棒的残余应变

Fig. 7 Residual strain of NiTi-SMA bars under different heat treatment processes

3.3 能量耗散与等效黏性阻尼比

不同热处理工艺下 NiTi-SMA 棒在各个循环中的能量耗散(以每循环耗能 E_d 表示)如图 8(a)所示。所有试件的单圈能耗随着加载幅值的增大而增大,且第 2 圈能耗小于第 1 圈,这与文献[22]中的描述一致。可以发现,试件 T350/30 在循环初期能量耗散较低,但随着循环次数的增加,能量耗散量呈指数增长趋势,在第 6 次循环时达到最高值,相比其他试件,试件 T350/30 第 2 圈耗能和第 1 圈耗能之间的差值最大。这可能是在较低热处理温度及较短热

处理时间下 NiTi-SMA 棒的超弹性性能没有被充分激发,试件在拉伸循环中存在较大残余变形,导致能量耗散随着循环次数的增加浮动较大。此外,其余试件在前5次应变幅值循环加载下表现出相对稳定的耗能增长趋势,然而,在第6次应变幅值下,试件的第2圈耗能明显降低,其中降低幅度最小的为试件 T400/30,相比第1圈降低了16%。这是由于试件在6%应变幅值加载下已经进入马氏体强化阶段,与前述对应力-应变曲线的分析一致。

为进一步评估不同热处理工艺对 NiTi-SMA 棒材滞回性能的影响,图8(b)给出了增幅循环拉伸后各试件的等效黏性阻尼比的变化规律。整体来看,等效阻尼比随着应变幅值的增加而逐渐增大。除试件 T350/30 外,当应变幅值达到5%时,等效黏性阻尼比达到最大值,随后随应变幅值的进一步增大而减小。经450℃热处理的试件,无论保温时间长短,其阻尼性能均优于350、400℃热处理的试件,这表明较高的热处理温度有助于改善 SMA 棒材的阻尼性能。在相同温度下,随着保温时间从15 min 增至30、45 min,等效黏性阻尼比有一定程度提高,如试件 T450/30 的阻尼比明显高于试件 T450/15。

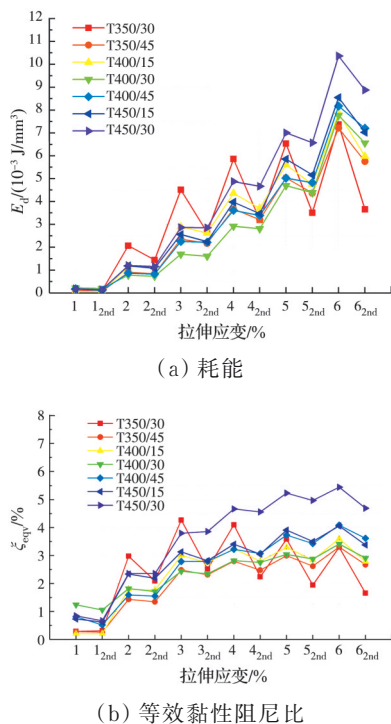


图8 不同热处理工艺下 NiTi-SMA 棒的滞回性能

Fig. 8 Hysteresis performance of NiTi-SMA bars under different heat treatment processes

3.4 割线刚度变化分析

图9为不同热处理工艺下 NiTi-SMA 棒在各个循环中的割线刚度变化。从图9可以看出,割线刚

度先随加载幅值的增大而减小,当应变幅值达到5%时,割线刚度趋于稳定。试件 T350/30 的割线刚度在加载初期较高,但随着加载幅值的增加而迅速下降。表明在该热处理条件下 SMA 棒材的刚度稳定性较差,可能是热处理时间不足所致。在400、450℃热处理温度下,割线刚度相对较低,且下降趋势较为平缓。表明较高的热处理温度可能有助于减少割线刚度的波动,提高材料的循环稳定性。其中试件 T400/30 的割线刚度为所有热处理工艺中最小的,波动也最小,此时 NiTi-SMA 棒材稳定性较好。

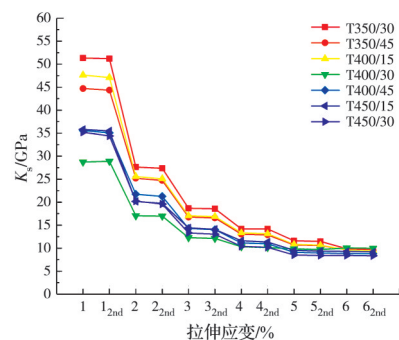


图9 割线刚度

Fig.9 Secant stiffness

4 结论

对7根工作直径为9 mm 的 NiTi-SMA 棒材进行增幅循环拉伸试验,评估不同热处理策略对其力学性能的影响。通过改变热处理的温度和时间来研究这些参数对 NiTi-SMA 棒材的超弹性、能量耗散能力和割线刚度的影响。得到以下主要结论:

1)通过合理的热处理工艺优化, NiTi-SMA 棒材的超弹性性能显著增强,其应力-应变关系呈典型的“旗帜形”滞回特征。在400~450℃范围内进行15~45 min 的热处理可有效减少残余应变,提高材料的自恢复能力,其中,在400℃下进行30 min 热处理时 NiTi-SMA 棒材具有最好的自复位能力。

2)在所设定热处理参数范围内,热处理条件下 NiTi-SMA 棒材在增幅循环加载过程中具有良好的能量耗散能力和超弹性性能,且当热处理条件趋近于该工况时,试样的能量耗散效率、割线刚度及等效阻尼比均呈更高的稳定性。

参考文献

- [1] Cisse C, Zaki W, Zineb T B. A review of constitutive models and modeling techniques for shape memory alloys [J]. International Journal of Plasticity, 2016, 76: 244-284.

- [2] 陈云, 吕西林, 蒋欢军. 减轻框架结构地震反应的新型消能减震装置[J]. 结构工程师, 2012, 28(2): 95-100.
Chen Y, Lu X L, Jiang H J. New energy dissipation device for mitigating seismic responses of frame structures[J]. Structural Engineers, 2012, 28(2): 95-100. (in Chinese)
- [3] Mohd Jani J, Leary M, Subic A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities[J]. Materials & Design, 2014, 56: 1078-1113.
- [4] 薛伟辰, 郑乔文, 刘振勇, 等. 结构振动控制智能材料研究及应用进展[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 213-217.
Xue W C, Zheng Q W, Liu Z Y, et al. Developments of research and application of smart materials in controlling structural vibration[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 213-217. (in Chinese)
- [5] 方成, 王伟, 陈以一. 基于超弹性形状记忆合金的钢结构抗震研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7): 1-12.
Fang C, Wang W, Chen Y Y. State-of-the-art for application of superelastic shape memory alloy in seismic resistant steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7): 1-12. (in Chinese)
- [6] Evrigen A, Karaman I, Pons J, et al. Role of nano-precipitation on the microstructure and shape memory characteristics of a new $\text{Ni}_{50.3}\text{Ti}_{34.7}\text{Zr}_{15}$ shape memory alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 655: 193-203.
- [7] Xia J, Omori T, Kainuma R. Abnormal grain growth in Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy with higher Al content[J]. Scripta Materialia, 2020, 187: 355-359.
- [8] Liu Y, Xie Z, van Humbeeck J, et al. Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys[J]. Acta Materialia, 1998, 46(12): 4325-4338.
- [9] 李灿军, 周臻, 谢钦. 摩擦耗能型SMA杆自复位梁柱节点滞回性能分析[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 115-123.
Li C J, Zhou Z, Xie Q. Hysteretic performance analysis of self-centering beam-column connections with SMA bars and friction energy dissipator[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 115-123. (in Chinese)
- [10] Wang W, Fang C, Liu J. Large size superelastic SMA bars: heat treatment strategy, mechanical property and seismic application[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(7): 075001.
- [11] 王伟, 邵红亮. 不同直径NiTi形状记忆合金棒材的超弹性试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(3): 168-174.
Wang W, Shao H L. Experimental investigation on mechanical properties of shape memory alloy bars in different sizes[J]. Structural Engineers, 2014, 30(3): 168-174. (in Chinese)
- [12] Xu X, Cheng G M, Zheng J H. Tests on pretrained superelastic NiTi shape memory alloy rods: towards application in self-centering link beams[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018(1): 2037376.
- [13] 俞昊然, 李维滨. NiTi形状记忆合金棒材的循环拉伸试验及力学性能退化分析[J]. 工业建筑, 2025, 55(5): 152-162.
Yu H R, Li W B. Cyclic tensile tests and mechanical property degradation analysis on NiTi shape memory alloy bars[J]. Industrial Construction, 2025, 55(5): 152-162. (in Chinese)
- [14] 康莉萍, 钱辉, 郭院成, 等. 不同热处理工艺的大直径形状记忆合金棒力学性能试验研究[J]. 功能材料, 2021, 52(1): 1185-1191.
Kang L P, Qian H, Guo Y C, et al. Experimental investigation on mechanical properties of large size shape memory alloy bars under different heat treatments[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(1): 1185-1191. (in Chinese)
- [15] 常召群, 刘伯权, 韩萌, 等. 新型自复位摩擦耗能阻尼器的设计及数值模拟分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 138-142, 221.
Chang Z Q, Liu B Q, Han M, et al. Design and numerical analysis of an innovative self-centering friction damper[J]. Industrial Construction, 2021, 51(9): 138-142, 221. (in Chinese)
- [16] Chen J B, Wang W, Fang C. Manufacturing, testing and simulation of novel SMA-based variable friction dampers with enhanced deformability[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103513.
- [17] 邱灿星, 刘家旺, 杜修力. SMA滑动摩擦阻尼器的数值模拟及参数分析[J]. 工程力学, 2022, 39(8): 69-79.
Qiu C X, Liu J W, Du X L. Numerical simulation and parametric study of shape memory alloy slip friction dampers[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(8): 69-79. (in Chinese)
- [18] Qiu C X, Liu J W, Du X L. Cyclic behavior of SMA slip friction damper[J]. Engineering Structures, 2022, 250: 113407.
- [19] Qiu C X, Liu J W, Jiang T Y, et al. Tests of double-stage SMA slip friction damper[J]. Engineering Structures, 2023, 288: 116171.
- [20] 邱灿星, 杨勇波, 刘家旺. 形状记忆合金滑动摩擦阻尼器自复位支撑受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(1): 139-150.
Qiu C X, Yang Y B, Liu J W. Research on mechanical behavior of a self-centering brace using SMA slip friction

damper[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(1): 139-150. (in Chinese)

[21] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].

GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature: [S]. (in Chinese)

[22] Ning Q J, Zhu L H, Han W, et al. Experimental study on mechanical properties of large NiTi superelastic shape memory alloy bars[J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(1): 015024.

[23] Evirgen A, Karaman I, Pons J, et al. Role of nano-precipitation on the microstructure and shape memory characteristics of a new Ni_{50.3}Ti_{34.7}Zr₁₅ shape memory alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 655: 193-203.

(编辑 王秀玲)